



KOREAN PATENT ABSTRACTS(KR)

Document Code:A

(11) Publication No.1020020077567 (43) Publication.Date. 20021012

(21) Application No.1020010017315 (22) Application Date. 20010402

(51) IPC Code:

H01S 5/20

(71) Applicant:

ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS RESEARCH INSTITUTE

(72) Inventor:

KIM, JE HA

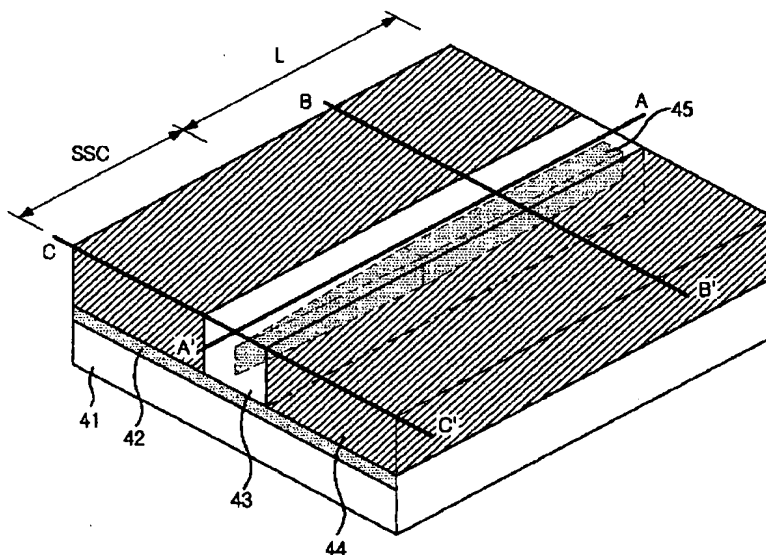
RYU, SANG WAN

(30) Priority:

(54) Title of Invention

SPOT-SIZE-CONVERTER INTEGRATED SEMICONDUCTOR LASER AND
FABRICATING THE SAME

Representative drawing



(57) Abstract:

PURPOSE: A spot-size-converter integrated semiconductor laser and fabricating the same are provided to be easily manufactured with optimizing the LASER and the SSC region, respectively.

CONSTITUTION: The device includes a first waveguide(42), a second waveguide(45) provided with the SSC region in the form of ridge and an active layer in a planar buried shape for coupling an optical mode to the first waveguide(42). The SSC region is formed in such a way that the width of the active layer is gradually reduced until the spot size of one end becomes approximately zero.

© KIPO 2003

(19) 대한민국특허청(KR) (12) 공개특허공보(A)

(51) Int. Cl. ⁷ H01S 5/20	(11) 공개번호 (43) 공개일자	특2002-0077567 2002년 10월 12일
(21) 출원번호	10-2001-0017315	
(22) 출원일자	2001년 04월 02일	
(71) 출원인	한국전자통신연구원	
(72) 발명자	대전 유성구 가정동 161번지 류상완 대전광역시유성구도룡동383-2과기원교수아파트2-403 김제하 대전광역시유성구전민동엑스포아파트207-1101	
(74) 대리인	특허법인 신성	

심사청구 : 있음

(54) 광모드 크기 변환기가 결합된 레이저 및 그 제조 방법

요약

본 발명은 렌즈없이 레이저와 광섬유간의 광결합을 용이하게 하도록 한 광모드 크기 변환기가 결합된 레이저에 관한 것으로, 제 1 도파로, 및 상기 제 1 도파로에 광모드가 결합되는 리지 형태의 광모드 크기 변환영역과 평면매립형태의 활성층으로 이루어진 제 2 도파로를 포함하며, 상기 광모드 크기 변환 영역은 상기 활성층의 폭이 감소하는 기울기로 형성된다.

이와 같이 본 발명에서는 평면매립형 레이저 구조와 쌍도파로 형태의 광모드 크기 변환영역을 결합시켰으며, 레이저활성층으로 이루어진 도파로의 측면패턴 형성시, 광모드 크기 변환 영역에서 도파로의 폭을 감소시켜 레이저 영역에서 방출된 빛이 손실없이 리지 형태의 도파로에 결합되도록 하여 원하는 광모드 특성을 얻을 수 있다.

대표도

도4

색인어

광모드 크기 변환기, SSC, 레이저, 리지, 평면매립형, 광모드

명세서

도면의 간단한 설명

도 1은 종래기술의 제 1 예에 따른 광모드 크기 변환기가 결합된 레이저의 구조 단면도,
도 2는 종래기술의 제 2 예에 따른 광모드 크기 변환기가 결합된 레이저의 구조 단면도,
도 3은 종래기술의 제 3 예에 따른 광모드 크기 변환기가 결합된 레이저의 구조 단면도,
도 4는 본 발명의 실시예에 따른 리지 형태의 광모드 크기 변환기가 결합된 레이저 구조의 개념도,
도 5a는 도 4의 A-A'선에 따른 도파로 영역의 구조 단면도,
도 5b는 도 4의 도파로 영역을 구성하는 각 층의 굴절률 그래프,
도 6a는 도 4의 B-B'선에 따른 구조 단면도,
도 6b는 도 4의 C-C'선에 따른 구조 단면도,
도 7a 내지 도 7f는 본 발명의 실시예에 따른 리지 형태의 광모드 크기 변환기가 결합된 평면매립형 레이저의 제조 공정 단면도,
도 8은 도 7b에 도시된 식각 공정을 수행하기 위해 제작된 질화규소막 패턴과 이를 이용하여 구현된 도파로 패턴의 개념도.

*도면의 주요 부분에 대한 부호의 설명

- | | |
|----------------------|------------------------------|
| 41 : n-InP 클래딩층 | 42 : 얇은 리지 코아층 |
| 43 : InP | 44 : 폴리이미드층 |
| 45 : 레이저 활성층 | 51 : n-InP 분리층 |
| 52 : 양자우물층 | 53 : 광가동층 |
| 54 : p-InP 클래딩층 | 55 : p ⁺ -InGaAs층 |
| 61 : 레이저 영역에서 광모드 분포 | 62 : p-InP 전류 차단층 |
| 63 : n-InP 전류 차단층 | 64 : SSC 끝단에서 광모드 분포 |

발명의 상세한 설명

발명의 목적

발명이 속하는 기술 및 그 분야의 종래기술

본 발명은 광소자에 관한 것으로서, 특히 광모드 크기 변환기(Spot Size Converter; SSC)가 결합된 평면 매립형 레이저 및 그 제조 방법에 관한 것이다.

일반적으로 광가입자망에 사용하는 저가의 광원 모듈을 제작하기 위해서는 렌즈 등 복잡한 광학계를 사용하지 않고도 쉽고 경제적으로 레이저와 광섬유간의 광결합이 이루어져야 한다. 그러나, 통상적인 반도체 레이저는 출력광을 단일 모드 광섬유와 결합시킬 때 큰 결합 손실을 갖는데, 이는 레이저 출력광의 모드와 단일모드 광섬유의 모드가 심한 크기 불일치를 보이기 때문이다.

통상 반도체 레이저의 모드 크기는 1 μ m 이고, 수직 방향과 수평 방향으로 크기가 다른 타원형의 형태를 갖는 반면, 단일모드 광섬유의 모드 크기는 10 μ m이고, 모드 모양이 원형이다.

이와 같은 문제를 해결하기 위하여, 레이저 영역과 결합하여 출력광의 모드 크기를 증가시키고 모드 모양을 원형으로 변화시켜 단일모드 광섬유와 쉽게 광결합을 하는 광모드 크기 변환기(이하 'SSC'라 약칭함) 구조에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 SSC를 이용함으로써 레이저와 광섬유 사이에 렌즈를 사용하지 않는 직접적인 광결합이 가능하고, 적은 광결합 손실, 그리고 큰 광정렬 허용오차 등을 얻을 수 있다.

SSC 결합 레이저 구조 설계에서 고려되어야 할 점은 다음과 같다. 먼저 레이저의 고성능 동작을 위해서 레이저 영역에서는 광모드가 레이저 활성층에 잘 속박되어 있어야 한다. 이는 광가동계수(Optical Confinement factor)를 증가시켜 레이저의 임계전류를 낮추는 역할을 한다.

그러나, SSC 영역에서는 레이저 활성층에 속박된 광모드를 점차적으로 방출하여 출력 계면에서의 광모드 크기가 충분히 증가되도록 해야 하고, SSC 영역은 광의 방사손실(Radiation loss) 없이 광모드 크기를 변화시켜 주는 역할을 하여야 한다.

최근에 다양한 SSC 구조들이 제안되었는데, 그 중 대표적인 몇 가지 구조를 살펴보겠다.

가장 먼저 제시된 방법은 선택적 영역 결정 성장법에 의해 도파로 두께를 변화시키는 구조로서, 도 1에 도시되어 있다.

도 1은 종래기술의 제1예에 따른 광모드 크기 변환기가 결합된 레이저의 구조 단면도로서, SSC 영역은 버트 조인트(Butt-joint) 결합 방식으로 레이저 도파로와 연결되는데, 버트 조인트 근처에서는 도파로의 두께가 크지만 두께를 점진적으로 줄여 SSC 영역 끝단에서는 0.1 μ m 이하로 줄어들어야 한다. 여기서, SSC 영역을 성장하면서 도파로 두께가 점진적으로 감소하는 구조는 선택적 영역 결정 성장법을 이용하여 구현된다.

여기서, 참조부호 11은 n형 전극, 12는 n형 Inp 클래딩층, 13,14는 각각 p형과 n형 InP 전류차단층, 15는 p-InP 클래딩층, 16은 p형 전극, 17은 수동도파로, 18은 레이저활성층, 19는 버트조인트 계면을 나타낸다.

그러나, 상술한 종래기술의 제 1 예는 두께가 두꺼운 부분과 얇은 부분에서 조성이 일치하지 않아 성장층이 응력을 받게 되고, 심하게 응력을 받게 되면 결정 특성이 저하되는 문제점이 있고, 또한 선택적 영역 결정 성장을 위하여 결정 성장 조건을 엄격하게 유지해야 하므로 결정 성장시 허용 오차가 작아지는 문제점이 있다.

이를 해결하기 위해, 도파로의 두께를 변화시키지 않고, 도파로 폭을 점진적으로 감소시켜 모드 크기를 증가시키는 방법이 제안되었는데, 이 방법은 선택적 영역 결정 성장을 사용하지 않는다는 장점이 있으나, 도파로 폭을 0.2~0.3 μ m까지 정밀하게 조절해야 하는 어려움이 있다. 이 정도의 정밀도는 사진전사를 사용할 수 없고 전자선묘화(E-beam lithography) 등의 방법이 이용되어야 하는데, 이 경우 대량 생산에 적합하지 않게 된다.

상술한 두 방법에서 SSC 영역 끝단에서의 도파로 구조에 의해 출력광의 모드 모양을 결정되므로 이곳에서의 도파로 모양에 따라 SSC의 특성이 큰 차이를 보인다. 하지만, SSC의 다른 특성들(예를 들면 방사손

실, 광모드 변환 거리 등)을 최적화하면서 동시에 SSC 끝단에서의 도파로 모양을 정밀하게 조절하는 것은 기술적으로 쉽지 않다.

이러한 문제점을 해결하기 위해, 쌍도파로(Double waveguide core) 구조의 SSC가 제안되었는데, 이는 SSC영역에 두 개의 도파로(A,B)를 만들고, 하나의 도파로 A는 레이저 영역과의 광결합 후 점차적으로 크기를 변화시켜 광모드를 방출하게 하고 또 하나의 도파로 B는 광성유와의 광결합을 위하여 큰 모드 크기를 갖도록 미리 제작하여 도파로 A에서 방출된 광을 수축하는 방법이 사용되고 있다.

이 경우에도 SSC 영역의 역할은 도파로 A의 두께나 폭을 줄여 도파로 A의 광을 도파로 B에 결합시켜 주는 것이다. 그러나, SSC 영역 끝단에서의 모드 모양이 도파로 A가 아닌 도파로 B의 모양에 의해 결정된다는 점에서 공정 변수와 무관하게 안정된 모드 크기 변환 특성을 얻을 수 있다는 장점이 있다.

이러한 방법을 적용한 예를 살펴보면, 도 2는 종래기술의 제2예에 따른 광모드 크기 변환기가 결합된 레이저의 구조 단면도로서, SSC 영역에서 레이저 활성층의 폭을 점차적으로 줄여 아래쪽에 형성된 얇은 두께의 도파로에 결합시키는 방식이다. 두 번의 식각을 통해 레이저 활성층(22)으로 이용되는 위쪽 도파로와 광모드 변환층(21)을 위한 아래쪽 도파로를 형성하고, 그 위에 전체적으로 p형 InP클래딩층(26)을 성장하여, 레이저 활성층(22)을 보호한다. 레이저 활성층(22) 근처에 형성되는 불필요한 p-n 접합은 프로톤(Proton) 주입을 통해 제거하고, p형 전극(27)을 증착한다.

상기 종래기술의 제2예는 제조 공정이 간단하지만, 불필요한 p-n 접합이 레이저 활성층(22) 뿐만 아니라 광모드 변환층(21)을 위한 도파로에서도 존재하게 되어 전류 주입 효율을 감소시키는 단점이 있다. 한편, 프로톤 주입을 이용하면 일부 불필요한 p-n 접합을 제거할 수 있지만, 공정의 특성상 완벽하게 p-n 접합을 제거하여 일반적인 평면 매립형 레이저와 같은 특성을 보일 수는 없는 문제점이 있다.

종래기술의 제 3 예는, 도 3에 도시된 바와 같이, 양자우물층을 포함한 레이저 활성층(33)을 일부 제거하고 테이퍼(Taper)를 위한 도파로만을 남긴 후 점차적으로 폭을 줄여 테이퍼층(32)을 형성하고 광모드를 이 테이퍼층(32)의 아래쪽에 형성된 얇은 도파로(31)에 결합시킨다.

도파로 보호를 위해 전체 SSC 영역에 InP(34)를 재성장한 후, 레이저 영역에서는 메사를 형성하고 2번의 재성장을 거쳐 평면 매립형 레이저 구조를 완성한 후, 최종적으로 SSC 영역에서 리지 도파로(Ridge waveguide)를 형성한다.

상기 종래기술의 제3예는, 레이저영역에서는 평면매립형 구조를 형성하고, SSC영역에서는 쌍도파로 구조를 갖도록 하여 각 영역의 설계를 독립적으로 최적화 할 수 있는 장점이 있으나, 제작을 위해서는 4번의 식각과 3번의 재성장을 수행하여야 하고, 또 각각의 공정이 갖는 허용오차가 매우 작아 공정이 지나치게 복잡한 단점이 있다.

현재까지 보고된 바에 따르면, 최적의 특성을 위해서는 레이저는 평면매립형 구조를 가져야 하고, SSC는 쌍도파로 구조를 가져야 한다.

그러나, 상술한 바와 같은 종래기술들에서 SSC 제작을 용이하게 할 수 있는 구조는 전체적인 레이저의 특성이 저하되게 되고, 레이저의 특성을 향상시키기 위해서는 SSC의 특성이 저하되게 된다. 한편, 두 영역을 동시에 최적화하는 구조는 지나치게 복잡한 공정이 필요하게 되므로 비용의 증가와 수율의 저하를 초래하게 된다.

따라서, 복잡한 구조를 사용하지 않으면서도, 레이저 영역과 SSC 영역을 각각 최적화할 수 있는 구조 및 공정 방법을 개발한다면 종래기술의 문제점을 극복하여 경제적이며 좋은 특성을 보이는 SSC 집적 레이저를 제작할 수 있을 것이다.

발명이 이루고자하는 기술적 과제

본 발명은 상기 종래기술의 문제점을 해결하기 위해 안출한 것으로서, 레이저나 SSC 영역을 각각 최적화하면서 용이하게 제조하도록 한 광모드 크기 변환기가 결합된 레이저 및 그 제조 방법을 제공하는데 그 목적이 있다.

발명의 구성 및 작용

상기의 목적을 달성하기 위한 본 발명의 광모드 크기 변환기가 결합된 광소자는 제 1 도파로; 및 상기 제 1 도파로에 광모드가 결합되는 리지 형태의 광모드 크기 변환영역과 평면매립형태의 활성층으로 이루어진 제 2 도파로를 포함하며, 상기 광모드 크기 변환 영역은 상기 활성층의 폭이 감소하는 기울기로 형성된 것을 특징으로 한다.

본 발명의 광모드 크기 변환기가 결합된 레이저의 제조 방법은 제 1 도파로, 분리층, 제 2 도파로를 순차적으로 형성하는 단계, 상기 제 2 도파로상에 유전층패턴을 형성하는 단계, 상기 유전층패턴을 마스크로 이용하여 상기 제 2 도파로를 언더컷 식각하여 레이저활성층과 광모드크기변환영역을 동시에 형성하는 단계, 상기 제 2 도파로 측면에 전류차단층을 형성하는 단계, 상기 전류차단층을 포함한 전면에 클래딩층을 형성하는 단계, 상기 클래딩층, 전류차단층 및 제 2 도파로를 선택적으로 식각하여 리지 패턴을 형성하는 단계, 및 상기 리지패턴의 양측에 폴리리미층을 형성하는 단계를 포함하여 이루어짐을 특징으로 한다.

바람직하게, 상기 제 2 도파로를 식각하는 단계에서, 상기 광모드 크기 변환영역은 상기 활성층의 폭이 감소하는 기울기로 형성되되, 기울기가 큰 제 1 영역과 기울기가 작은 제 2 영역으로 형성되는 것을 특징으로 한다.

이하, 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자가 본 발명의 기술적 사상을 용이하게 실시할 수 있을 정도로 상세히 설명하기 위하여, 본 발명의 가장 바람직한 실시예를 첨부 도면을 참조하여 설명하기로 한다.

도 4는 본 발명의 실시예에 따른 리지형태의 SSC 결합 평면 매립형 레이저를 도시한 도면으로서, 제 1 도파로로서 리지 코아층(42)과 제 2 도파로로서 레이저활성층(45)을 형성하고, 레이저활성층(45)을 수직 식각하여 레이저영역(L)을 형성한다.

이와 동시에 광모드 크기 변환영역(SSC)을 형성하기 위하여 제 2 도파로인 레이저활성층(45)을 폭이 감소하는 기울기로 식각한다.

여기서, 리지 코아층(42)은 얇은 두께를 가지며, 레이저활성층(45)은 리지 코아층(42)에 비해 두께가 두꺼우며 광모드 크기 변환영역(SSC)의 끝단으로 갈수록 폭이 작아진다.

도 4를 참조하여 자세히 설명하면, 기판(도시 생략)상에 n-InP 클래딩층(41)을 형성하고, n-InP 클래딩층(41)상에 리지 코아층(42)을 형성하며, 리지 코아층(42)상에 InP층(43)에 평면매립된 레이저활성층(45)을 형성한다.

여기서, InP층(43)은 레이저활성층(45)과 리지코아층(42) 사이에 광가동층/n형 InP 분리층(53/51)이 적층되어 이루어지고, 레이저활성층(45) 상부에 p-InP 클래딩층(54)이 형성된다.

또한, 리지 코아층(42)상에 폴리이미드층(44)을 형성하여 레이저영역(L)과 광모드 크기 변환 영역(SSC)을 보호한다.

상기한 바와 같이, 본 발명의 실시예에 따른 레이저는 쌍도파로, 예컨대 리지 코아층(42)과 레이저활성층(45)으로 이루어지고, 레이저 활성층(45)의 폭을 통상의 평면매립형 레이저 제작 공정과 같은 $1\mu\text{m} \sim 2\mu\text{m}$ 로 일정하게 유지하다가, 광모드 크기 변환 영역(SSC)에서 폭을 점차적으로 줄여 광모드 크기 변환 영역(SSC)의 끝단에서는 완전히 그 폭이 없어지도록 한다.

이와 같은 방법으로 레이저 영역(L)에서는 높은 광가동계수를 갖도록 하여 고성능의 레이저 동작을 보장하며, 광모드 크기 변환 영역(SSC)에서는 레이저 활성층(45)에 구속된 광모드를 점차적으로 얇은 리지 코아층(42)으로 이동시켜 광모드 크기를 증가시키고, 결과적으로 방사각을 감소시켜 광성유와의 결합을 효율적으로 이루게 한다.

도 5a는 도 4의 A-A'선에 따른 구조 단면도이고, 도 5b는 각 구성층들의 성장방향에 따른 굴절율을 도시한 그래프이다.

도 5a에 도시된 바와 같이, 제 1 도파로인 얇은 리지 코아층(42)은 50nm 의 InGaAsP($E_g=1.13\text{eV}$)로 이루어지고, 광가동층(53)으로 사용되는 InGaAsP($E_g=1.0\text{eV}$)와 양자우물층(52)으로 이루어진 레이저 활성층(45)이 제 2 도파로를 형성하고, 두 도파로를 분리하기 위하여 두 도파로 사이에 n-InP 분리층(51)을 끼워 넣는다. 이와 같은 구조 위에 p-InP 클래딩층(54)과 p^+ -InGaAs층(55)을 성장하여 전체 도파로 구조를 완성한다.

도 5b를 참조하여 굴절률 분포를 살펴보면, 제 1 도파로인 리지코아층(42)은 제 2 도파로를 구성하는 양자우물층(52)에 비해 굴절율 및 두께가 작고, n-InP클래딩층(41), n-InP 분리층(51), p-InP클래딩층(54)는 굴절율이 리지코아층(42)에 비해 작고 이들 층들의 굴절율은 모두 동일하다.

도 6a는 도 4의 B-B'선에 따른 단면도로서, 레이저영역(L)만을 도시하고 있다.

도 6a에 도시된 바와 같이, 레이저 영역(L)에서는 두 도파로, 리지 코아층(42)과 레이저활성층(45)가 동시에 존재하는데, 이 경우 상대적으로 두껍고 굴절률 차이가 큰 레이저활성층(45)에 의해 작은 광모드 분포(61)가 결정된다. 따라서, 일반적인 레이저 구조와 동일한 광모드 모양을 얻을 수 있다.

도 6b는 도 4의 C-C'선에 따른 단면도로서, 광모드 크기 변환 영역(SSC)의 끝단을 도시하고 있다.

도 6b에 도시된 바와 같이, 광모드 크기 변환 영역(SSC)의 끝단에서는 제 2 도파로인 레이저활성층(45)이 없거나 있더라도 폭이 너무 적어 광모드 분포에는 영향을 주지 않는다. 따라서, 출력광의 모드 특성은 제 1 도파로인 리지코아층(42)에 의해 결정되게 된다. 리지 코아층(42)은 작은 굴절률 차이와 얇은 두께로 인해 광가동능력이 떨어져서 큰 광모드의 분포(64)가 결정되므로, 결국 리지 코아층(42)의 구조에 따라 광모드 크기 변환 영역(SSC)의 특성을 설계할 수 있다.

도 7a내지 도 7h는 본 발명의 실시예에 따른 리지 형태의 SSC 결합 평면매립형 레이저의 제조 공정 단면도이다.

도 7a에 도시된 바와 같이, InP 기판(도시 생략)상에 n-InP클래딩층(41), 리지 코아층(42), n-InP 분리층(51), 레이저활성층(45)을 순차적으로 형성한 후, 레이저활성층(45) 표면에 얇은 p-InP층(71)과 InGaAs층(72)을 성장한다. 여기서, InGaAs층(72)은 뒤에 수행할 식각 공정 중 식각 모양을 조절하기 위하여 사용된다.

도 7b에 도시된 바와 같이, InGaAs층(72)상에 질화규소막(73)을 증착한 후, 질화규소막(73)을 선택적으로 식각하여 도파로를 형성하기 위한 질화규소막(73) 패턴을 형성한 후, 질화규소막(73) 패턴을 이용하여 InGaAs층(72), p-InP층(71), 레이저 활성층(45), n-InP 분리층(51)을 식각하므로써 제 2 도파로를 형성한다.

이 때, 질화규소막(73) 패턴 하부에 언더컷(Undercut)을 형성하기 위해 습식 식각을 실시하며, 형성되는 제 2 도파로의 폭은 질화규소막(73) 패턴의 폭보다 작다.

다시 말하면, $1\mu\text{m}$ 이하의 미세한 조절이 필요한 도파로 패턴을 $2\mu\text{m} \sim 3\mu\text{m}$ 폭의 질화규소막(73) 패턴과 언더컷을 이용하여 쉽게 구현할 수 있다. $2\mu\text{m} \sim 3\mu\text{m}$ 폭의 패턴은 사진 전사로도 충분히 구현할 수 있어, 제

작 공정을 단순화 할 수 있다.

도 8을 참조하면, 도 8은 질화규소막(81) 패턴과 도파로 패턴(82)의 개념도를 나타낸 것으로, 식각에 이용되는 언더컷이 $1\mu\text{m}$ 라고 하면, 통상 사용되는 레이저 활성층 도파로의 폭이 $1.5\mu\text{m}$ 이므로, 질화규소막(81) 패턴은 $3.5\mu\text{m}$ 의 폭을 갖는다.

광모드 크기 변환 영역(SSC)에서 도파로의 폭이 점차적으로 줄어들어 0이 되는데, 이러한 패턴은 질화규소막(81)에 형성된 패턴의 폭($d_1=3.5\mu\text{m}$, $d_2=2\mu\text{m}$)을 점차적으로 줄여 $2\mu\text{m}$ 가 되게 하고 언더컷 식각을 이용해서 용이하게 구현이 가능하다. 한편 광모드 크기 변환 영역(SSC)을 다시 두 개의 영역(83,84)으로 나누어 도파로 폭이 줄어드는 기울기를 달리하였다.

즉, 도파로 폭(L_1)이 $1.5\mu\text{m}$ 에서 $0.5\mu\text{m}$ (L_2)로 줄어드는 영역(83)은 광손실과 무관하므로 기울기를 크게 해서 광모드 크기 변환 영역(SSC)의 길이를 줄였고(약 $50\mu\text{m}$ 이하), 도파로 폭이 $0.5\mu\text{m}$ 이하(L_3)의 영역(84)은 기울기를 크게 하면 광손실이 생길 수 있으므로 가능하면 기울기를 작게 하여 광모드의 이동이 천천히 일어나도록 하였다. 이렇게 하면 광모드 크기 변환 영역(SSC)에 의해 연장된 활성층의 길이를 효과적으로 제어하게 되어 레이저의 동작 효율을 향상시킬 수 있다.

도 7c에 도시된 바와 같이, 질화규소막(73) 패턴을 이용하여 평면매립형 구조를 형성하기 위하여, p-n-p 전류차단층(62,63)을 재성장한다.

도 7d에 도시된 바와 같이, 질화규소막(73) 패턴과 InGaAs층(72)을 제거한 후, 전면에서 p-InP 클래딩층(54)과 접촉저항을 감소시키기 위한 $p^+-\text{InGaAs}$ 층(55)을 형성한다.

도 7e에 도시된 바와 같이, 전류 확산을 막기 위하여 $p^+-\text{InGaAs}$ 패턴(55a)을 형성한 후, $p^+-\text{InGaAs}$ 패턴(55a) 하부의 p-InP 클래딩층(54), p-n-p 전류차단층(62,63), n-InP 분리층(51)을 선택적으로 식각하여 리지 구조를 형성한다. 이 때, 리지구조의 폭과 깊이를 정밀하게 조절하기 위해서 반응성 이온 식각(Reactive Ion Etching: RIE)과 선택적 습식 식각을 함께 이용한다.

도 7f에 도시된 바와 같이, 리지구조가 형성된 후 표면 평탄화를 위해 폴리이미드(44)를 채운 후, $p^+-\text{InGaAs}$ 패턴(55a)을 포함한 폴리이미드(44)상에 질화규소막(73)을 이용한 보호막을 형성한 후 $p^+-\text{InGaAs}$ 패턴(55a)에 접촉되는 p형 금속 전극(74)을 증착한다.

상술한 바와 같이, 리지 구조의 광모드 크기 변환기(SSC)가 결합된 평면매립형 레이저는 통상의 평면 매립형 레이저에 비해 한 번의 식각과 폴리이미드 공정만을 더 포함하고 있다. 통상의 평면매립형 레이저는 이미 전 제작 공정이 잘 알려져 있고, 추가되는 식각과 폴리이미드 공정의 공정 유연성이 크므로, 위의 방법을 이용하면 별도의 공정상의 어려움 없이 광모드 크기 변환기가 결합된 레이저 구조를 경제적으로 대량생산 할 수 있게 된다. 또한 제작 결과 형성된 레이저는 평면매립형 구조로 최적화되었고 SSC는 리지를 이용한 쌍도파로 구조로서, 두 영역이 모두 최적화되었을 알 수 있다.

본 발명의 다른 실시예로서, 본 발명의 일 실시예에서 1차 에피 성장 중 선택적 영역 결정 성장법을 이용하여, 광모드 크기 변환 영역(SSC) 영역에서 레이저 활성층의 밴드갭(Bandgap)을 변화시키는 구조를 이용한다.

이와 같은 구조에서는 광모드 크기 변환 영역(SSC)에서 흡수가 일어나지 않아, 전류를 주입할 필요가 없으므로 레이저의 임계전류를 감소시키는 효과가 있다.

본 발명의 또 다른 실시예로서, 일 실시예에서 제시한 리지 형태의 광모드 크기 변환기를 레이저 이외의 평면 매립형 도파로 구조와 결합시키는 것이다. 평면매립형 구조는 레이저 이외에도 반도체 광증폭기(Semiconductor optical amplifier), 광변조기(Optical modulator), 다모드 간섭기(Multimode inteferometer) 등의 다양한 광소자에 사용되고 있다.

본 발명의 기술 사상은 상기 바람직한 실시예에 따라 구체적으로 기술되었으나, 상기한 실시예는 그 설명을 위한 것이며 그 제한을 위한 것이 아님을 주의하여야 한다. 또한, 본 발명의 기술 분야의 통상의 전문가라면 본 발명의 기술 사상의 범위 내에서 다양한 실시예가 가능함을 이해할 수 있을 것이다.

발명의 효과

상술한 바와 같은 본 발명은 리지를 이용한 쌍도파로 구조의 광모드 크기 변환영역(SSC)과 평면매립형 레이저영역을 동시에 최적화하면서 공정을 단순화시킬 수 있는 효과가 있다.

또한, 레이저 출력광과 광섬유와의 결합을 용이하게 하여, 광정렬을 위한 비용을 절감하고 광결합 효율을 크게 향상시킬 수 있다.

(57) 청구의 범위

청구항 1

광모드 크기 변환기가 결합된 광소자에 있어서,

제 1 도파로; 및

상기 제 1 도파로에 광모드가 결합되는 리지 형태의 광모드 크기 변환영역과 평면매립형태의 활성층으로 이루어진 제 2 도파로를 포함하며,

상기 광모드 크기 변환 영역은 상기 활성층의 폭이 감소하는 기울기로 형성된 것을 특징으로 하는 광모드 크기 변환기가 결합된 광소자.

청구항 2

제 1 항에 있어서,

상기 제 1 도파로는 상기 제 2 도파로에 비해 굴절을 차이가 작은 층으로 이루어지며, 상기 제 1 도파로는 상기 제 2 도파로에 비해 그 두께가 작은 것을 특징으로 하는 광모드 크기 변환기가 결합된 광소자.

청구항 3

제 1 항에 있어서,

상기 제 2 도파로는 언더컷 식각된 것을 특징으로 하는 광모드 크기 변환기가 결합된 광소자.

청구항 4

제 1 항에 있어서,

상기 광모드 크기 변환 영역은 상기 활성층에 접하며 폭이 감소하는 기울기가 큰 제 1 영역과 폭이 감소하는 기울기가 작은 제 2 영역을 포함함을 특징으로 하는 광모드 크기 변환기가 결합된 광소자.

청구항 5

제 4 항에 있어서,

상기 제 1 영역은 $1\mu\text{m} \sim 1.5\mu\text{m}$ 의 폭을 가지며, 상기 제 2 영역은 $0\mu\text{m} \sim 0.5\mu\text{m}$ 의 폭을 갖는 것을 특징으로 하는 광모드 크기 변환기가 결합된 광소자.

청구항 6

제 1 항에 있어서,

상기 제 2 도파로는 선택적 영역 결정 성장법으로 형성된 것을 특징으로 하는 광모드 크기 변환기가 결합된 광소자.

청구항 7

제 1 항에 있어서,

상기 제 1 도파로와 상기 제 2 도파로 사이에 분리층이 삽입된 것을 특징으로 하는 광모드 크기 변환기가 결합된 광소자.

청구항 8

제 1 항에 있어서,

상기 활성층은 레이저, 반도체광증폭기, 광변조기 또는 다모드 간섭기 중 어느 하나의 활성층을 포함하는 것을 특징으로 하는 광모드 크기 변환기가 결합된 광소자.

청구항 9

광모드 크기 변환기가 결합된 광소자의 제조 방법에 있어서,

제 1 도파로, 분리층, 제 2 도파로를 순차적으로 형성하는 단계;

상기 제 2 도파로상에 유전층패턴을 형성하는 단계;

상기 유전층패턴을 마스크로 이용하여 상기 제 2 도파로를 언더컷 식각하여 레이저활성층과 광모드크기 변환영역을 동시에 형성하는 단계;

상기 제 2 도파로 측면에 전류차단층을 형성하는 단계;

상기 전류차단층을 포함한 전면에 클래딩층을 형성하는 단계;

상기 클래딩층, 전류차단층 및 제 2 도파로를 선택적으로 식각하여 리지 패턴을 형성하는 단계; 및

상기 리지패턴의 양측에 폴리이밀층을 형성하는 단계
를 포함하여 이루어짐을 특징으로 하는 광모드 크기 변환기가 결합된 평면매립형 레이저의 제조 방법.

청구항 10

제 9 항에 있어서,
상기 유전층패턴을 형성하는 단계에서,
상기 유전층패턴은 질화규소막을 포함하되, $2\mu\text{m}\sim 3\mu\text{m}$ 의 폭으로 형성되는 것을 특징으로 하는 광모드 크기 변환기가 결합된 평면매립형 레이저의 제조 방법.

청구항 11

제 9 항에 있어서,
상기 제 2 도파로를 식각하는 단계는,
습식식각으로 이루어지는 것을 특징으로 하는 광모드 크기 변환기가 결합된 평면매립형 레이저의 제조 방법.

청구항 12

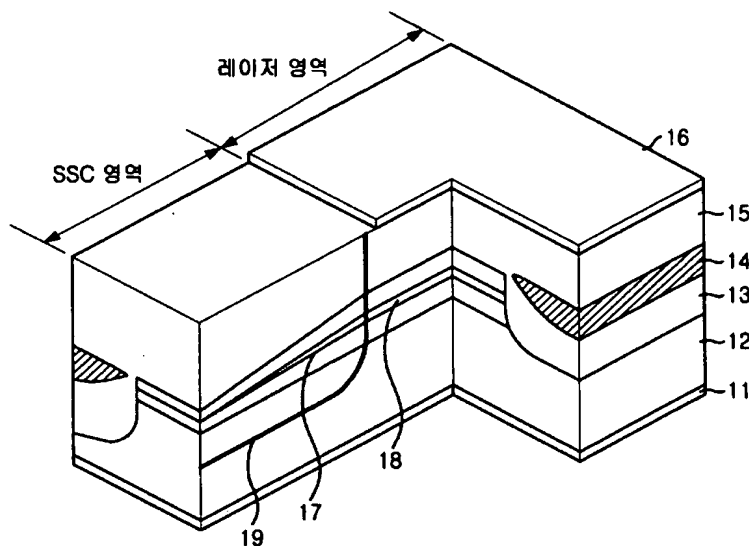
제 9 항에 있어서,
상기 제 2 도파로를 식각하는 단계에서,
상기 광모드 크기 변환영역은 상기 활성층의 폭이 감소하는 기울기로 형성되되, 기울기가 큰 제 1 영역과 기울기가 작은 제 2 영역으로 형성되는 것을 특징으로 하는 광모드 크기 변환기가 결합된 평면매립형 레이저의 제조 방법.

청구항 13

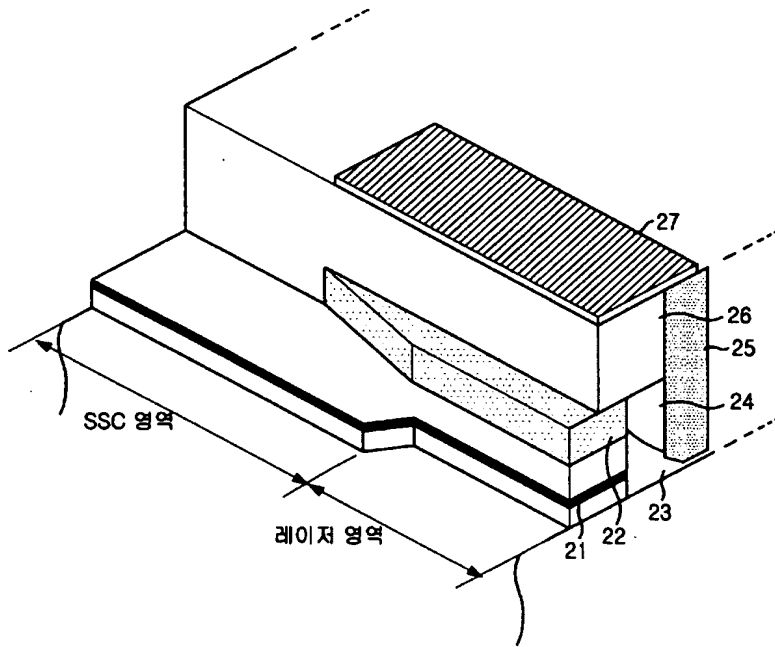
제 9 항에 있어서,
상기 리지패턴을 형성하는 단계는,
반응성이온식각과 선택적 습식식각을 혼용하여 이루어지는 것을 특징으로 하는 광모드 크기 변환기가 결합된 레이저의 제조 방법.

도면

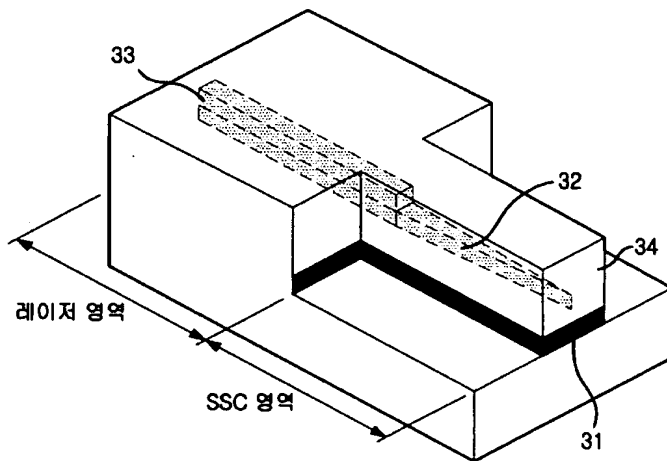
도면1



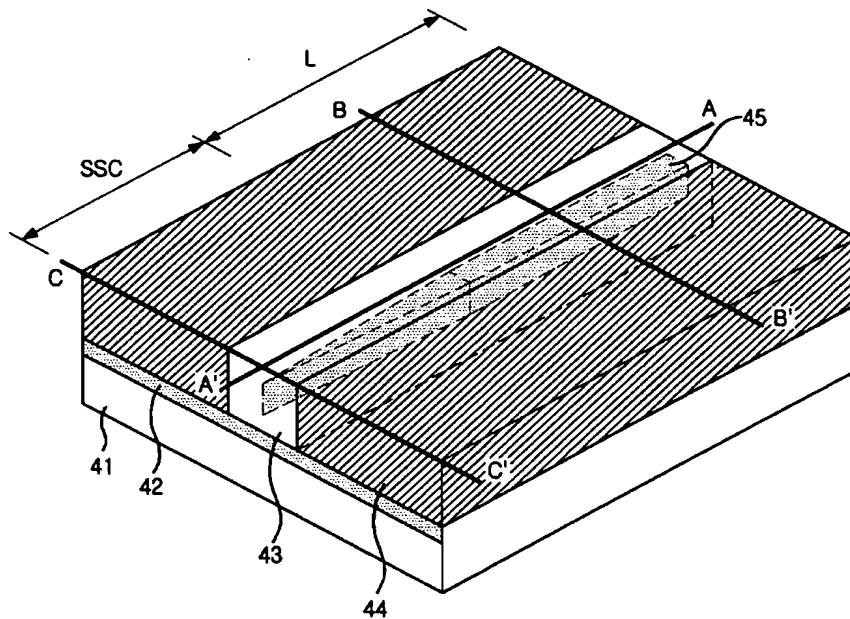
도면2



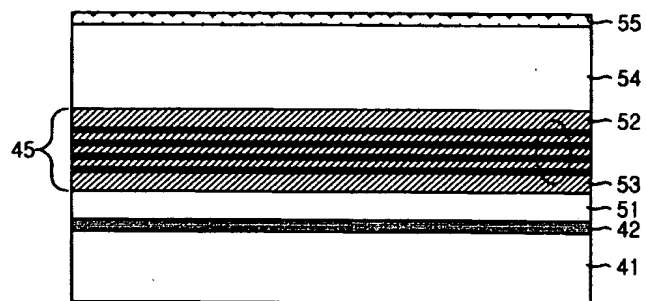
도면3



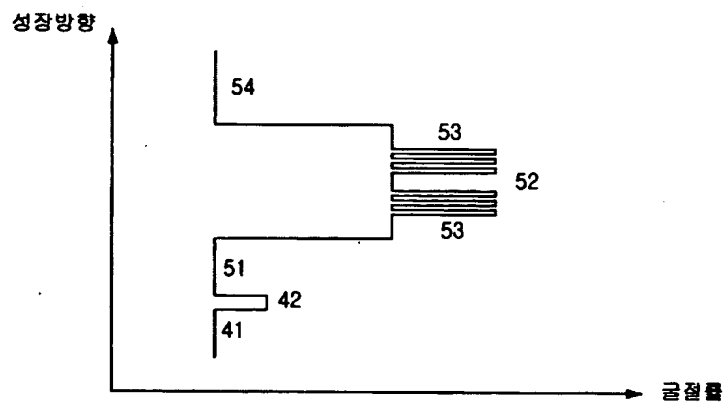
도면4



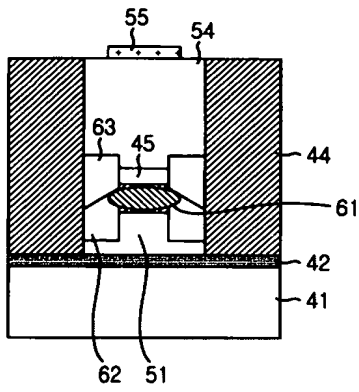
도면 5a



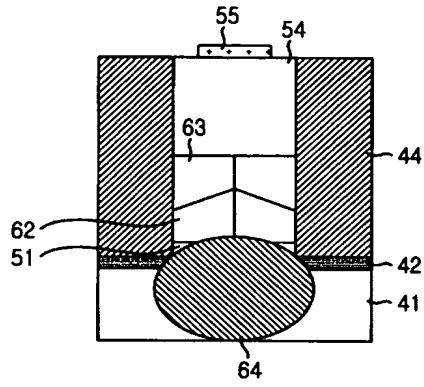
도면5b



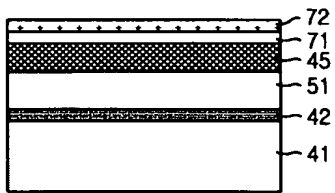
도면 6a



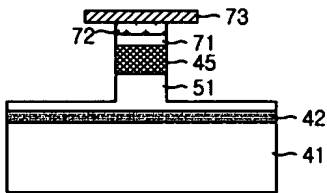
도면 6b



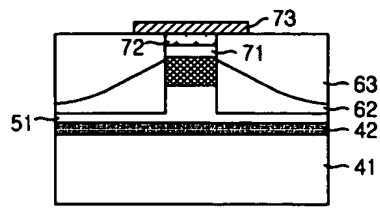
도면 7a



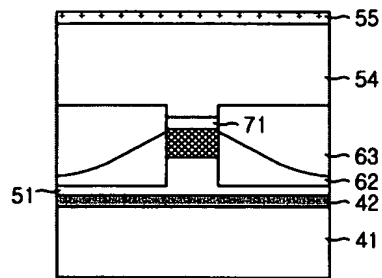
도면 7b



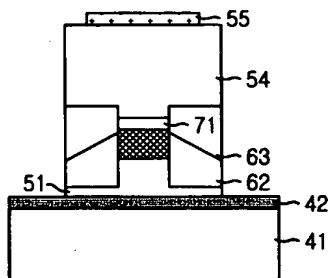
도면7c



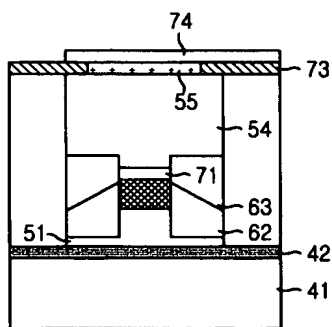
도면7d



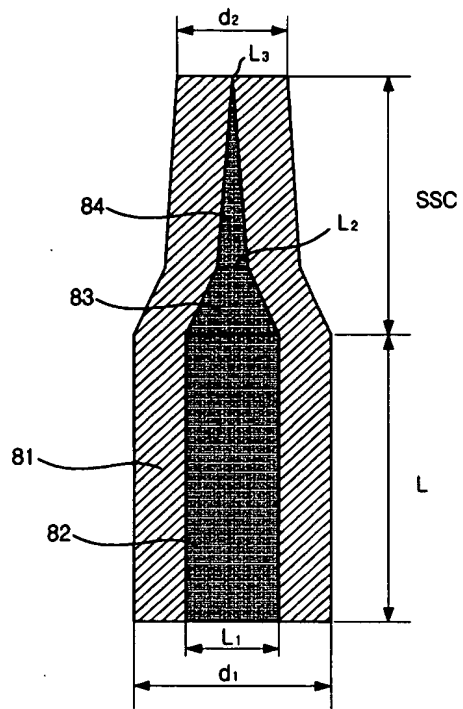
도면7e



도면7f



도면8



nent (J_1) with suppressed-carrier (J_0) and higher-order components (J_{-3} ...). Here, J_n is a Bessel function, and ω is a carrier angular frequency.

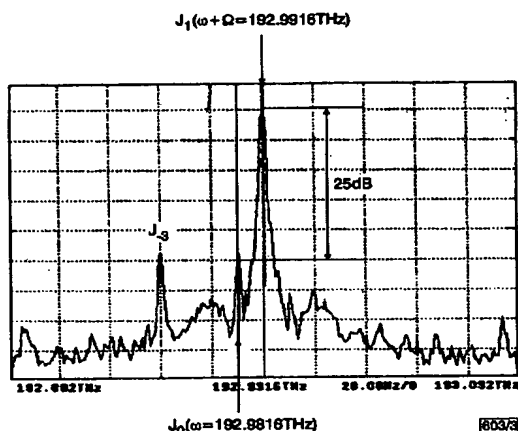


Fig. 3 Upper sideband spectrum output from x-cut LN OSSBM

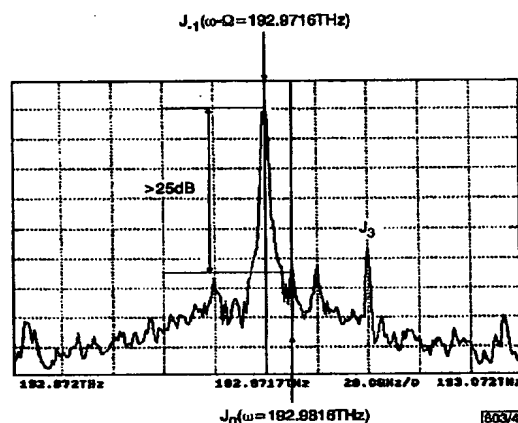


Fig. 4 Lower sideband spectrum output from x-cut LN OSSBM

The SC performance of the x-cut LN OSSBM was evaluated using $\lambda = 1553.5\text{nm}$ LD light and an $\Omega = 10.0\text{GHz}$ RF single-tone signal. The LD light was input into the OSSBM via a polarisation-controller in between, and the OSSBM output was monitored by a spectrum-analyser. The RF electrical signal was divided into cosine and sine waves, and their powers were adjusted at the same level using attenuators before being supplied to the OSSBM RF electrodes. The optical phase differences between the first and the second waveguide arms of MZA, as well as between the third and the fourth arms of MZB, were accurately tuned by applying bias to the corresponding DC electrode of the sub-MZ. The optical phase difference between MZA and MZB was adjusted mainly using the electrical phase-shifter installed in one of the RF lines. Additionally, by applying bias to the DC electrode of the main MZ of the OSSBM, the phase difference was finely maintained at $\pi/2$.

Results: The obtained upper sideband SC spectrum is shown in Fig. 3. The angular frequency, ω , of the carrier (J_0) was 192.9816THz ($\lambda = 1553.5\text{nm}$). Regarding the upper sideband, the intensified first-order component, J_1 , appeared at $\omega + \Omega = 192.9916\text{THz}$ as expected, and the carrier suppression ratio J_1/J_0 was found to be 25dB . The distinction ratio of J_0 to J_{-3} was also observed to be over 20dB , supporting a practical SSB-SC performance of the x-cut LN OSSBM. The RF driving voltage to achieve the maximum SC ratio was $8.0\text{V}_{\text{p-p}}$. Similar results were observed in the lower sideband, as shown in Fig. 4. The carrier suppression ratio J_{-1}/J_0 was higher than 25dB .

Conclusion: An x-cut LN OSSBM has been demonstrated to successfully work at 10GHz with a carrier suppression ratio over 25dB .

© IEE 2001

Electronics Letters Online No: 20010342

DOI: 10.1049/el:20010342

K. Higuma, S. Oikawa, Y. Hashimoto and H. Nagata (Optoelectronics Research Division, New Technology Research Laboratories, 585 Toyotomi-cho, Funabashi, Chiba 274-8601, Japan)

E-mail: hinagata@sits.soc.co.jp

M. Izutsu (Communications Research Laboratory, Ministry of Public Management, Home Affairs, Posts and Telecommunications, 4-2-1 Nukui-Kitamachi, Koganei, Tokyo 184-8795, Japan)

References

1. IZUTSU, M., SHIKAMA, S., and SUETA, T.: 'Integrated optical SSB modulator/frequency shifter', *IEEE J. Quantum Electron.*, 1981, QE-17, pp. 2225-2227
2. SHIMOTSU, S., OIKAWA, S., SAITO, T., MITSUGI, N., KUBODERA, K., KAWANISHI, T., and IZUTSU, M.: 'LiNbO₃ optical single-sideband modulator'. Opt. Fiber Commun. Conf., OFC 2000, Baltimore, USA, February 2000, Paper PD-16
3. HIGUMA, K., HASHIMOTO, Y., YATSUKI, M., and NAGATA, H.: 'Electrode design to suppress thermal drift in lithium niobate modulators', *Electron. Lett.*, 2000, 36, pp. 2013-2014

Low-cost, polarisation independent, tapered photodiodes with bandwidth over 50GHz

S. Demiguel, L. Giraudet, P. Pagnod-Rossiaux, E. Boucherez, C. Jany, L. Carpentier, V. Coupe, S. Fock-Yee, J. Decobert and F. Devaux

50GHz bandwidth photodiodes, attaining a compression point of $+12\text{dBm}$, have been fabricated. The structure design allows an almost complete absorption at $25\mu\text{m}$, corresponding to 0.5A/W responsivity and gives a polarisation dependence as low as $\pm 0.1\text{dB}$. These components have been realised with a low-cost technology including etched waveguide input facet, antireflection coating on wafer and cleaving V-grooves.

Introduction: High-speed optical-fibre communication systems over 40Gbit/s are required for optical links in the near future. Over the past ten years, work on detectors to reach such data rates has focused mainly on side-illuminated photodiodes. These have been investigated in order to improve the efficiency-bandwidth product compared to top-illuminated photodiodes, and have led to bandwidth as high as 110GHz with a responsivity of 0.63A/W [1].

A drawback of side-illuminated photodiodes is the highly sophisticated packaging procedure needed to achieve good coupling performance. The cost of the photoreceiver grows consequently and could penalise some applications. One solution is to use an evanescently coupling photodiode integrating a spot size converter so as to enlarge alignment tolerances [2].

Our solution is based on evanescently-coupled photodiodes monolithically integrating a very low polarisation dependent spot size converter, leading to improved coupling efficiency and relaxed alignment tolerances. Furthermore, our device integrates etched waveguide input facet with antireflection coating on wafer, as well as V-grooves for precise cleaving. This drastically reduces the fabrication cost compared to the conventional process (antireflection coating after cleaving).

This Letter describes the design and technology of the double stage taper photodiode (DSTP). An optical analysis is also reported on tapers to determine the optimal geometry of the component. Responsivities of 0.37 , 0.46 and 0.50A/W have been achieved, with less than $\pm 0.1\text{dB}$ polarisation dependence, on 10 , 20 and $25\mu\text{m}$ -length diode, respectively. -3dB bandwidth measurements on 50Ω load, corresponding to these lengths, are 50 , 41 and 36GHz . Finally, 7mA saturation current has been measured at 50GHz and only -1V reverse bias.

Photodiode design and fabrication: The DSTP structure shown in Fig. 1 is grown by MOVPE on a semi-insulating substrate. The DSTP structure proposed here integrates a design previously reported for phasor applications [3]. A $9\mu\text{m}$ -wide monomode input waveguide with three thin InGaAsP ($1.05\mu\text{m}$ bandgap) layers, in which is embedded a $0.7\mu\text{m}$ InP layer, allows good coupling performance with standard fibres.

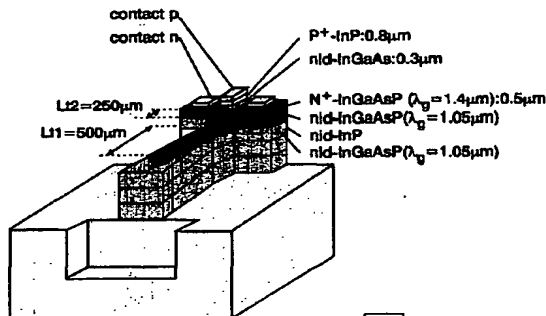


Fig. 1 Schematic structure of double stage taper photodiode

The light is at first coupled to a monomode taper where power is confined in the InGaAsP ($1.05\mu\text{m}$ band gap) layer. Then the light is driven to the second multimode taper. The InGaAsP ($1.4\mu\text{m}$ bandgap) second taper layer serves on the one hand as an n -type contact layer and on the other hand as an optical matching layer [4]. A better optical transition between the first taper and the absorbing layer is achieved.

Our technology uses conventional contact lithography and does not require regrowth steps or electron beam lithography, thus allowing cost reduction. The photodiode mesa and both tapers are patterned using RIE. The first and second taper tips have 1 and $0.5\mu\text{m}$ widths, respectively. The input waveguide facet is etched using a RIE process to provide smooth and vertical etching. Antireflection coating is also deposited on-wafer and patterned with simple chemical etching. This fabrication technique allows on-wafer characterisation and screening of fully functional devices, further reducing the fabrication costs.

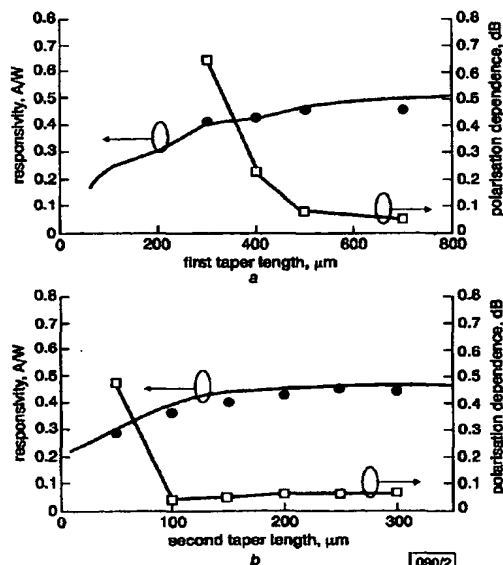


Fig. 2 Responsivity and polarisation dependence against taper length

a First taper length ($L2 = 250\mu\text{m}$)
b Second taper length ($L1 = 500\mu\text{m}$)
—●— responsivity calculations
● responsivity measurements
—□— polarisation sensitivity measurements

Results: Finite-difference 3D-BPM was used for evaluating photodiode internal quantum efficiency, η_i , and the coupling efficiency, η_c , is estimated from overlap integrals between the fibre Gaussian mode and the input facet mode.

Figs. 2a and b show the measured and simulated responsivity at $1.55\mu\text{m}$ wavelength as a function of the first and the second taper lengths, $L1$ and $L2$, for a $4 \times 20\mu\text{m}^2$ photodiode. These Figures also show the measured polarisation dependence.

Measurements indicate 0.46A/W as best responsivity for $L1 = 500\mu\text{m}$ and $L2 = 250\mu\text{m}$. As propagation losses grow with taper length, responsivities do not increase beyond these values. The polarisation dependence is higher when the first taper is short. $L1 = 400\mu\text{m}$ is necessary to achieve less than $\pm 0.2\text{dB}$ polarisation dependence and good homogeneity on wafer, while $L2 = 100\mu\text{m}$ is efficient for the second taper. In agreement with BPM modelling, a first taper length of $500\mu\text{m}$ is required to obtain a low polarisation dependence spot size converter.

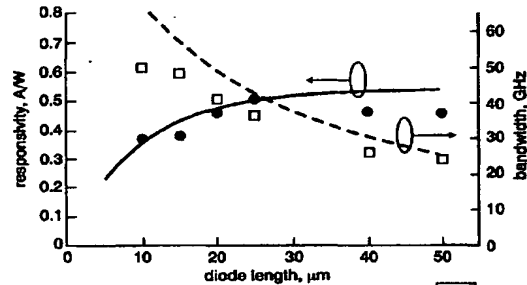


Fig. 3 Responsivity and -3dB bandwidth against diode length

$L1 = 500\mu\text{m}$, $L2 = 250\mu\text{m}$
—●— responsivity calculations
● responsivity measurements
—□— bandwidth calculations
□ bandwidth measurements

Fig. 3 shows experimental responsivities and corresponding -3dB bandwidth, as a function of diode length, for $4\mu\text{m}$ diode width. This Figure shows that light absorption takes place in the first $25\mu\text{m}$, leading to 0.5A/W . No significant variation with the polarisation is observed whatever the diode length. The polarisation dependence is very low, less than $\pm 0.1\text{dB}$. 0.37 , 0.46 and 0.5A/W responsivities, as well as -3dB bandwidth of 50 , 41 and 36GHz , have been measured for 10 , 20 and $25\mu\text{m}$ -long diodes, respectively. The best responsivities are obtained for standard lensed fibre having $5.8\mu\text{m}$ spot size. The corresponding -1dB alignment tolerances reach 3 and $2.2\mu\text{m}$ for horizontal and vertical direction, respectively.

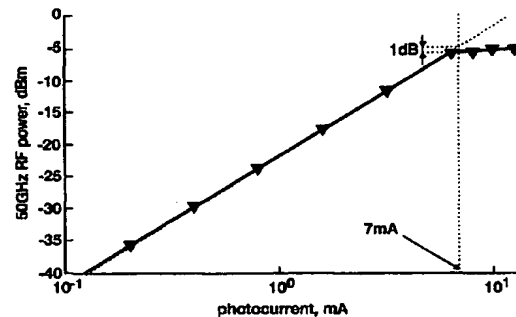


Fig. 4 50GHz RF power against photocurrent for $4 \times 20\mu\text{m}^2$ diodes

Finally, these diodes also show an excellent high power behaviour (see Fig. 4): the -1dB power compression point, measured at 50GHz , is only reached over $+12\text{dBm}$ optical power corresponding to a 7mA saturation current with only -1V reverse bias (the setup uses two beating lasers for generating 50GHz optical signal). The overall photodiode performances (power, responsivity, etc.) can be improved further by better contact resistance as well as input facet fabrication, e.g. cleaved samples show responsivity in the 0.6A/W range.

Conclusion: Double stage taper photodiodes have been realised with low-cost process for high-speed applications. An etched waveguide input facet technique with antireflection coating on wafer was used, together with V-grooves for precise cleaving. 50GHz bandwidth and over +12dBm optical power have been achieved. 0.5A/W responsivity has been measured for a 25µm-long diode. Polarisation dependence is as low as ±0.1dB. These diodes are suitable for 40Gbit/s and radio over fibre applications.

Acknowledgments: The authors thank the members of the OPTIMM RNRT project for their contribution to this work.

© IEE 2001
Electronics Letters Online No: 20010338
DOI: 10.1049/el:20010338

26 February 2001

S. Demiguel, P. Pagnod-Rossiaux, E. Boucherez, C. Jany, L. Carpentier, V. Coupe and F. Devaux (OPTO+, Groupement d'intérêt économique, Alcatel Corporate Research Center, Route de Nozay, 91460 Marcoussis, France)

E-mail: stephane.demiguel@optoplus.fr

L. Giraudet, S. Fock-Yee and J. Decobert (OPTO+, Groupement d'intérêt économique, France Telecom R&D, Route de Nozay, 91460 Marcoussis, France)

References

- 1 KATO, K., KOZEN, A., MURAMOTO, Y., ITAYA, Y., NAGATSUMA, T., and YAITA, M.: '110-GHz, 50%-efficiency mushroom-mesa p-i-n photodiode for a 1.55-µm wavelength', *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1994, 6, (6), pp. 719-721
- 2 UMBACH, A., TROMMER, D., STEINGRUBER, R., SEEGER, A., EBERT, W., and UNTERBORSCH, G.: 'Ultrafast, high-power 1.55µm side-illuminated photodetector with integrated spot size converter'. Proc. OFC'00, Baltimore, USA, March 2000, Paper FG2, pp. 2143-2145
- 3 BRUNO, A., RIGNY, A., RAMUS, C., SIK, H., LANDREAU, J., and CARENCO, A.: 'Very low loss polarisation independent taper without epitaxial regrowth using conventional photolithography'. Proc. ECIO'97, Stockholm, Sweden, April 1997, Paper Eth F3-1, pp. 283-286
- 4 GIRAUDET, L., BANFI, F., DEMIGUEL, S., and HERVE-GRUYER, G.: 'Optical design of evanescently coupled, waveguide-fed photodiodes for ultra wide-band applications', *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1999, 11, (1), pp. 111-113

Photovoltaic effect in CdS on flexible substrate

M.S. Shur, J. Sinius, R. Gaska and S. Rumyantsev

The authors report on the photovoltaic effect in CdS/CuS films deposited on flexible substrates at temperatures close to room temperature from using the water solutions of complex-salt compounds. The results demonstrate the feasibility of using this material for photovoltaic applications requiring covering of large complex surfaces.

Solar cells on flexible and, ideally, stretchable substrates should find numerous applications in consumer and defence electronics for covering surfaces of complex shape in order to provide light-weight compact local power sources, which are more adaptable to the direction of illumination. Such cells might also be used as power sources for the artificial 'sensitive skin', which incorporates intelligent, flexible large-area sensor arrays along with software and data-processing capabilities. Such skin has been proposed for numerous applications in robotics, medicine, biology, industrial controls and defence [1, 2]. Future applications might involve solar batteries on textiles for electro-textile applications.

In this Letter, we report on the fabrication and characterisation of such a photovoltaic element on a flexible substrate (viewfoil) using the deposition of polycrystalline semiconductor CdS and metal films at low temperatures (close to room temperature). Our results demonstrate the feasibility of using such cells for applications requiring covering large-area, complex shape surfaces.

Our approach to fabricating such cells is based on our new process of depositing polycrystalline CdS (with a bandgap of 2.4eV) and Cu₂S (semiconductor/metal) films on flexible substrates at temperatures close to room temperature. Large-area surfaces can be covered. We have covered areas up to 8.5 × 11 inches but the process can be scaled up. The work is also under way to develop semiconductor threads and semiconductor cloth based on this technology. The devices built on these semiconducting and metal films will serve as building blocks for thin-film technology, which will enable us to develop the sensitive skin arrays. Their properties are strongly affected by processing. These new material systems are ideally suited for 'sensitive skin' and electro-textile applications, since these films are suitable for development of optical, thermal, piezoelectric and pyroelectric [3] sensors.

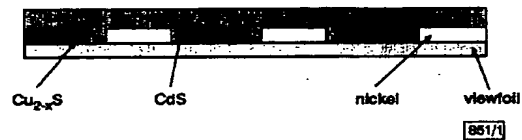


Fig. 1 Sample configuration

The basic scheme of our film deposition process is described in [4]. We fabricated two types of structures. Structure 1 represented a lateral solar cell with alternating Cu₂S and nickel contact stripes deposited on top of a viewfoil (see Fig. 1). These sets of contacts represented 'ohmic' and 'non-ohmic' contacts, respectively. Then CdS films approximately 0.5µm thick were deposited on top using the water solutions of complex-salt compounds.

Structure 2 was a 'sandwich' type photovoltaic cell, where the CdS film was sandwiched between an In₂O₃ layer deposited on a view foil and a Cu₂S layer deposited on top.

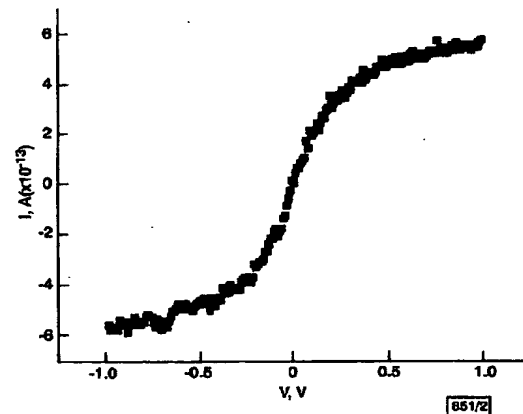


Fig. 2 Dark current-voltage characteristics

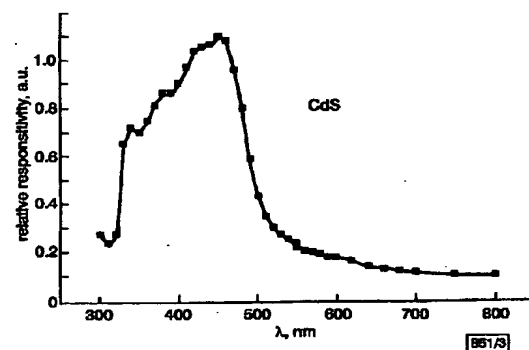


Fig. 3 Spectral responsivity

Fig. 2 shows typical dark current-voltage characteristics measured for Structure 1. As can be seen from the Figure, the current-